

Planung und Simulation wandlungsfähiger Supply Chains in der Produktion elektrifizierter Antriebe

Planning and Simulation of Changeable Supply Chains in the Production of Electrified Powertrains

Jens Niemann, BMW AG, München (Germany), jens.niemann@bmw.de
Andreas Schlegel, Matthias Putz, Fraunhofer IWU, Chemnitz (Germany),
andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de, matthias.putz@iwu.fraunhofer.de

Abstract: The current generation of electric vehicles is characterised by increasing market growth. Factors like customer behaviour, infrastructure, new competitors, and technological improvements lead to high demand uncertainties and volatile volume forecasts. In line with the changing market environment, there is a change in the supply chain regarding purchased components, suppliers, and market power. The changed supply chain structure and market uncertainties cause significant challenges for automobile manufacturers in the capacity and flexibility planning of their changeable production systems and supply chains. This paper presents a novel capacity planning process for changeable production systems and supply chains. The capacity planning approach presented in this paper addresses the application of a simulation as the basis of a decision support system to improve capacity planning in an uncertain market environment. The simulation results show that the novel planning approach, in combination with the simulation, leads to an increase in production and supply chain flexibility while reducing operating and flexibility costs.

1 Einführung

Die aktuelle Generation an Elektrofahrzeugen zeichnet sich durch ein zunehmendes Marktwachstum aus. Allein von 2017 bis 2018 stieg die Anzahl an Neuzulassungen um 89 % auf 2,42 Mio. PKW (ZSW 2019). Besonders gefördert wird diese Entwicklung durch hohe Emissionsstandards, die Verknappung fossiler Brennstoffe, den Umweltschutz und durch politische Maßnahmen (z. B. durch Kaufprämien). Zusätzlich zu diesen Einflüssen induzieren unsichere Faktoren wie das Kundenverhalten, die Infrastruktur, mögliche neue Wettbewerber sowie technologische Verbesserungen eine hohe Volatilität in den prognostizierten Marktvolumen für Elektrofahrzeuge. (Kampker 2014). Auf Grund dieser Unsicherheiten werden in der Produktion elektrifizierter Fahrzeuge verstärkt wandlungsfähige Produktionskonzepte mit Flexibilitätsmaßnahmen kombiniert. Sie

sollen erwirken, dass möglichst wirtschaftlich auf verschiedene Bedarfsszenarien reagiert werden kann. Die Kapazität der wandlungsfähigen Produktionssysteme wird durch eine konventionelle Kapazitätsplanung determiniert, die auf diskreten Stückzahlenszenarien basiert und die Freiheitsgrade der Wandlungsfähigkeit nur unzureichend integriert (Creutzmacher et al. 2016). Aus diesem Grund muss die konventionelle Kapazitätsplanung für wandlungsfähige Produktionssysteme erweitert werden, damit die Marktunsicherheit und die flexibel einsetzbaren Wandlungsoptionen berücksichtigt und die Produktionskapazität unter der Prämisse einer wirtschaftlichen Produktion optimiert werden können.

Im Einklang mit dem sich ändernden Marktumfeld findet auch ein Wandel der automobilen Supply Chain statt. Dabei werden sich die Einkaufsvolumen konventioneller Antriebe verringern, während die Einkaufsvolumen von Lieferanten elektrischer Komponenten steigen. In Zuge dessen treten neue Lieferanten in den Markt ein und neue Supply Chains entstehen. (Kampker 2014) Diese Veränderung in Kombination mit der gestiegenen Bedeutung der Supply Chains in der Elektromobilität (Klug 2013) führt dazu, dass nicht nur die Produktionen, sondern vor allem die Supply Chains der Hersteller untereinander konkurrieren. Die Koordination und Absicherung in der Supply Chain wird von Lieferverträgen übernommen. In der Praxis werden volumenflexible Verträge oder Optionsverträge, z. B. die Vergabematrix, eingesetzt um Produktionskapazitäten der Lieferanten zu sichern. Damit die wandlungsfähige Produktion optimal genutzt werden kann, müssen die Supply Chains und damit die Lieferverträge eine Gestaltung wandlungsfähiger Produktionen bei den Lieferanten fördern. Um eine Synchronisation zwischen den Automobilherstellern und den Lieferanten zu gewährleisten, werden diese in der vorliegenden Arbeit mit in die Kapazitätsplanung integriert (Niemann et al. 2018).

Die Ergebnisse der Kapazitätsplanung für wandlungsfähige Produktionssysteme bieten verschiedene Möglichkeiten zur Gestaltung des Produktionssystems. Um diese in zahlreichen Szenarien frühzeitig testen zu können, wird eine System-Dynamics-Simulation aufgebaut. Mithilfe dieser werden die Auswirkungen der verschiedenen Wandlungskonfigurationen hinsichtlich ihrer resultierenden Kosten und Flexibilität bewertet und eine abschließende Handlungsempfehlung abgeleitet.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer Definition der verwendeten Begrifflichkeiten und einer Darstellung des aktuellen Stands der Technik. Anschließend wird ein Kapazitätsplanungsprozess vorgeschlagen, der die obigen Anforderungen berücksichtigt. Den Kern der Arbeit bildet der aktuelle Entwicklungsstand der Simulation, die ein fester Bestandteil des Prozesses ist und für die finale Überprüfung und Entscheidung für einen Kapazitätsplan eingesetzt wird. An einem realitätsnahen Beispielszenario wird die Wirksamkeit des simulationsintegrierten Kapazitätsplanungsprozesses geprüft werden. Die Ausführungen enden mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick über weitere Forschungsvorhaben.

2 Stand der Technik

Zur Entwicklung einer Kapazitätsplanung für wandlungsfähige Produktionssysteme und einer simulationsbasierten Entscheidungsunterstützung werden aktuelle Erkenntnisse in den folgenden Forschungsbereichen herausgearbeitet:

1. produktionswirtschaftliche Flexibilität, Supply-Chain-Flexibilität und Wandlungsfähigkeit
2. Kapazitätsplanung und Terminierung von Produktionskapazitäten
3. Synchronisation und Optimierung von Supply Chains, insbesondere mit Bezug zur Gestaltung von Vertragsmengen

In der Literatur werden die Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit unterschiedlich definiert. Daher steht am Anfang eine Definition der unterschiedlichen Flexibilitätsarten sowie der Wandlungsfähigkeit.

Die Volumenflexibilität wird häufig auch als Mengen- oder Kapazitätsflexibilität bezeichnet (Seebacher 2013). Sie beschreibt die Fähigkeit, ein Produktionssystem mit unterschiedlichen Kapazitätsauslastungen und wechselnden Produktionsmengen wirtschaftlich zu betreiben. Hierbei werden Flexibilitätsmaßnahmen oder -bausteine eingesetzt, wie z. B. Zusatzschichten oder Pausendurchfahrten. Die Supply-Chain-Flexibilität definiert die Anpassungsfähigkeit eines Kunden-Lieferanten-Verhältnisses an sich ändernde Nachfragemengen oder abweichende Lieferbedingungen (Das und Abdel-Malek 2003). Diese Definition wird von Stevenson und Spring (2009) um den Aspekt der konstanten Qualität der gefertigten Produkte erweitert und wird in der vorliegenden Arbeit angewendet.

Die Wandlungsfähigkeit entfaltet laut Seebacher ihre Wirkung, sobald der Flexibilitätskorridor überschritten wird. Möller (2008) definiert die Wandlungsfähigkeit als „die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich durch Strukturveränderungen schnell an Veränderungen in der Umwelt anzupassen“. Die Wandlungsfähigkeit umfasst dabei verschiedene Wandlungstreiber: Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität, Kompatibilität. In diesem Beitrag wird nur die Skalierbarkeit betrachtet, da sie der Treiber für sich ändernde Volumen ist. Skalierbarkeit bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die technische, örtliche und personelle Möglichkeit, Fabrikelemente und Produktionssysteme zu erweitern und zu reduzieren (Westkämper und Zahn 2009). Dabei wird unter einer Wandlungsoption die kapazitive Produktionserweiterung durch Investitionen verstanden.

Die Wandlungsfähigkeit und die Flexibilität fließen mit in die Kapazitätsplanung ein. Diese determiniert die Höhe und den Zeitpunkt des Kapazitätsausbaus und ist für die Produktion von hoher strategischer Bedeutung. Die Frage des optimalen Zeitpunkts zum Kapazitätsausbau wird aus verschiedenen Perspektiven und Umfeldern betrachtet. Besonders relevant für diese Arbeit sind die Veröffentlichungen von Wen et al. (2015), Lukas et al. (2017) und Hagspiel et al. (2016), da die Autoren die Auswirkungen einer Anpassung der Produktionskapazität in einem unsicheren bzw. volatilen Marktumfeld untersuchen. Die Ergebnisse in diesen Publikationen widersprechen sich, während Wen et al. (2015) und Lukas et al. (2017) in volatilen Märkten einen früheren Kapazitätsausbau befürworten, schlagen Hagspiel et al. (2016) vor, die Kapazitäten verzögert auszubauen, um eine frühzeitige Kapitalbindung zu vermeiden. Die Forschung in der vorliegenden Publikation greift damit den wissenschaftlichen Diskurs auf, grenzt sich allerdings von bisherigen Arbeiten ab, da diese Arbeiten nicht die Wandlungsfähigkeit eines

Produktionssystemen berücksichtigen, sondern von einmaligen Investitionen ausgehen. In dieser Arbeit wird sowohl der Zeitpunkt als auch die Höhe des Kapazitätsausbaus determiniert.

Ein gewandeltes Produktionssystem bietet für ein Unternehmen ausschließlich Vorteile, wenn die Supply Chain ausreichend Kapazität zur Verfügung stehen hat und keine Lieferengpässe entstehen. In diesem Zusammenhang wird von Supply-Chain-Kapazität gesprochen, deren Bedeutung Mai und Jiang (2012) für die Schaffung von Wettbewerbsvorteilen hervorheben sowie zu der Martínez Sánchez und Pérez Pérez (2005) eine positive Korrelation zwischen der Supply-Chain-Kapazität und der Unternehmensleistung feststellen. Im wissenschaftlichen Diskurs existieren verschiedene Herangehensweisen zur Sicherung der Kapazität und Flexibilität. Zapp et al. (2012) schlagen ein kollaboratives Modell für die Zusammenarbeit zwischen OEM und Lieferant in der Automobilindustrie vor. Weitere Arbeiten setzen sich mit der Simulation von Lieferverträgen auseinander und geben eine Empfehlung über die bevorzugte Vertragsart ab (Knoblich et al. 2012). Wang et al. (2016) und Davis et al. (2018) hingegen untersuchen das Verhalten des Lieferanten hinsichtlich einer möglichen Kapazitätserweiterung und in welchen Fällen ein Lieferant gewillt ist, die Kosten und das Risiko einer Vertragserweiterung zu tragen. Um diese a-posteriori-Entscheidung zu vermeiden, wird in der vorliegenden Arbeit bereits bei der Gestaltung der Vertragsparameter, in diesem Fall dem vertraglich vereinbarten Volumen, angesetzt. Dadurch sollen spätere Kapazitätsausbauten vermieden werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die gefundenen Forschungsdefizite in einer Kapazitätsplanung und Simulation wandlungsfähiger Supply Chains zusammengeführt werden. Für grundlegende Arbeiten zur Simulationmethode System Dynamics wird auf Forrester (1990) und Sterman (2000) verwiesen.

3 Simulation in der Kapazitätsplanung wandlungsfähiger Supply Chains

Der simulationsintegrierte Kapazitätsplanungsprozess besteht aus drei Optimierungsbausteinen in Matlab® und einem System-Dynamics-Modell in PowerSim® (vgl. Abb. 1).

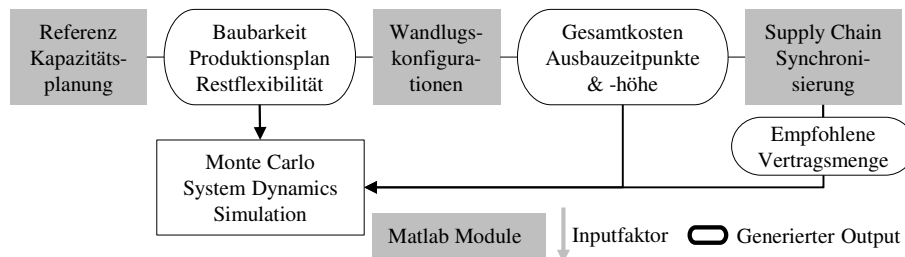


Abbildung 1: Ablauf der Kapazitätsplanung wandlungsfähiger Produktionssysteme

Im Folgenden werden zunächst der Ablauf und in Kurzform die Optimierungsschritte vorgestellt. Anschließend wird auf den Aufbau und den Ablauf der Simulation eingegangen.

3.1 Kapazitätsplanungsprozess für wandlungsfähige Supply Chains

Zu Beginn des Kapazitätsplanungsprozesses für wandlungsfähige Supply Chains wird zunächst ein Referenzproduktionsplan erstellt, der auf dem aktuellen Planstand der Produktion und dem wahrscheinlichsten Volumenszenario beruht. Hierfür wird die jeweils verfügbare Kapazität anhand der Basiskapazität, welche durch die Maschinenkapazität sowie die vorab geplanten Wandlungsoptionen determiniert wird, und den Einsatz von verschiedenen Schichtmodellen und Flexibilitätsmaßnahmen kalkuliert. Die Verwendung der Wandlungsoptionen richtet sich nach den Zeitpunkten, in denen eine Kapazitätserweiterung erforderlich ist, um die Marktbedarfe weiterhin decken zu können. Der Produktionsplan wird durch eine lineare ganzzahlige Optimierung erstellt und fungiert im weiteren Verlauf der Methode als Referenzplan.

Im zweiten Schritt der Methode werden verschiedene Wandlungskonfigurationen bewertet. Hierbei werden alle Kombinationen der zu berücksichtigten Wandlungsoptionen für den Betrachtungszeitraum und die festzulegende Zeitintervallgröße aufgestellt, die eine vorgezogene oder erweiterte Investition ermöglichen. Der Einsatz von Wandlungsfähigkeitsmaßnahmen verändert die verfügbare Produktionskapazität, sodass für jede Wandlungskonfiguration auch ein neuer Produktionsplan berechnet wird. Abgeleitet aus den jeweiligen Produktionsplänen werden für jede Wandlungskonfiguration anschließend die Flexibilitätskosten sowie weitere mögliche Einzahlungen ermittelt und die Differenz zum Referenzplan berechnet. Anschließend wird der Realloptionsansatz angewendet, um die Vorteilhaftigkeit der einzelnen Wandlungskonfigurationen im Vergleich zum Referenzplan bewerten zu können.

Der dritte Schritt beinhaltet für jede Wandlungskonfiguration die Optimierung der Vertragsmengen in den Lieferverträgen. Das Ziel dieses Schrittes ist eine Synchronisierung der Produktionskapazitäten und -flexibilität in der Supply Chain, um Lieferengpässe und unausgewogene Kapazitäten zu vermeiden. Durch eine Optimierung wird beim volumenflexiblen Vertrag die optimale Vertragsmenge ermittelt. Die Zielfunktion besteht in diesem Fall aus den Gesamtkosten und einem Synchronisierungsfaktor zwischen den Produktionssystemen der Supply-Chain-Partner. Dieser Vertrag bietet keine Möglichkeit, eine wandlungsfähige Supply Chain zu erzeugen, sondern wird hinsichtlich der Supply-Chain-Flexibilität optimiert.

Neben dem volumenflexiblen Vertrag wird ebenfalls die in vorherigen Publikationen entwickelte Vergabematrix betrachtet. In diesem Ansatz werden wandlungsfähige Produktionssysteme von den Lieferanten angefordert. Der Lieferant bietet verschiedene Volumenstufen sowie Stückpreise pro Jahr und Volumenstufe für seine Produkte an. Mit einer definierten Vorlaufzeit hat der Kunde die Möglichkeit, bei Bedarf zwischen den Volumenstufen zu wechseln. Ein Beispiel dafür ist in Tabelle 1 zu sehen. Bei der Vergabematrix werden die Volumenstufen in Bezug auf die Kosten und der Synchronisation der Produktionssysteme optimiert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Kapazität in der Supply Chain synchronisiert ist und eine wandlungsfähige Supply Chain existiert.

Tabelle 1: Darstellung der Vergabematrix mit beispielhaften Werten

Volumen (tsd. Einheiten)	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	
9	29	303 €	290 €	288 €	288 €	285 €
30	58		288 €	281 €	278 €	275 €
...
290	318			266 €	263 €	260 €

Der letzte Schritt ist eine Monte-Carlo-Simulation in dem System-Dynamics-Modell der verschiedenen Wandlungskonfigurationen mit den zugehörigen optimierten Vertragsmengen, auf das im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

3.2 Aufbau der Simulation in System Dynamics

Die Simulation in der Planungsphase wird, VDI 3633 Blatt 1 folgend, u. a. zur Ermittlung von Grenzwerten in der Produktion und des Einflusses von Kapazitätsänderungen eingesetzt und kann auf die vorgestellte Methode angewendet werden. System Dynamics bietet die Möglichkeit, durch Rückkopplungen z.B. den Einfluss der Produktionsressourcen auf die Kapazität zu simulieren, weshalb die Simulationsmethode präferiert wird. In diesem Abschnitt wird die Struktur des System-Dynamics-Modells vorgestellt. Für die Entwicklung des Modells wird PowerSim Studio 10 Professional eingesetzt. Die Simulation umfasst einen Zeitraum von 60 Monaten und die Zeitintervallgröße ist ein Monat. Das vorliegende Modell gliedert sich in vier Submodule:

1. *Nachfrage*: Einlesen der nachgefragten Bedarfe als Inputgröße.
2. *Produktion des OEMs*: Berechnung der verfügbaren Kapazität und der notwendigen Produktionsressourcen (z. B. Fläche und Personal).
3. *Lieferant*: Die Produktion des Lieferanten spiegelt die vertraglich zugesicherten Kapazitäten für den volumenflexiblen Vertrag und die Vergabematrix wider.
4. *Kosten und Flexibilität*: in dem letzten Modul werden die Gesamtkosten für die Produktion des OEMs und des Lieferanten, sowie die resultierenden Flexibilitäten berechnet.

Das Submodul „*Nachfrage*“ importiert die monatlichen Produktionsbedarfe. Den Nachfrageszenarien liegen insgesamt 10 Prognosen für die Nachfrageentwicklung der Elektromobilität zugrunde. Als Ausgangsszenario wird das Mittelwert-Szenario importiert. Die Nachfrage ist der einzige Input-Parameter, der in jeder Replikation geändert wird.

Im zweiten Submodul wird die „*Produktion des OEMs*“ abgebildet. Der Kern besteht dabei aus der Bestimmung der vorhandenen Kapazität. Dafür werden die vorhandenen Wandlungskonfigurationen, die Schichtmodelle sowie alle erlaubten Kombinationen der Flexibilitätsmaßnahmen importiert. Die Berechnung der aktuell vorhandenen Produktionskapazität setzt sich aus der Basiskapazität und der gewählten Wandlungskonfiguration zusammen, die jeweils in Einheiten pro Stunde gemessen werden, sowie der Produktionszeit, die durch das Arbeitszeitmodell determiniert ist. Letzteres besteht aus der Auswahl des Schichtmodells und der Flexibilitätsbausteine.

Die Auswahl des Arbeitszeitmodells basiert auf der maximalen Produktionsauslastung. Ausgehend von der Wandlungskonfiguration wird der Flächenbedarf für jede Wandlungsfähigkeitsstufe abgeleitet. Der Personalbedarf ergibt sich aus der Kombination des Arbeitszeitmodells und der Wandlungskonfiguration, da durch jede Wandlungsoption der Personalbedarf ansteigt.

Im dritten Submodul „*Lieferanten*“ werden der volumenflexible Vertrag und die Vergabematrix abgebildet. Für beide Vertragsarten findet eine Kapazitätsüberprüfung statt. Diese ist zweigeteilt in eine Überprüfung der jährlichen und monatlichen Bedarfe. Dies ist notwendig, da die vertraglichen Volumen pro Jahr mit einer maximalen Abnahme pro Tag vereinbart werden. Daraus wird die maximale Abnahme pro Monat berechnet. Außerdem werden in diesem Submodul die Kosten je Vertrag kalkuliert. Für den volumenflexiblen Vertrag werden die Kosten unterschieden in reguläre Kosten, sofern sich die Jahresbedarfe in dem Flexibilitätskorridor befinden, und Strafkosten, die bei einer Unter- bzw. Überschreitung auftreten. Die Kosten der Vergabematrix richten sich nach der jeweiligen Volumenstufe und dem Jahr.

Das letzte Modul „*Kosten und Flexibilität*“ verwendet die Ergebnisse der vorherigen Submodule und leitet daraus die Flexibilität des OEMs, der Lieferanten und der Supply Chain sowie die Flexibilitäts- und Schichtkosten, die Produktionskosten und die Gesamtkosten ab. Des Weiteren werden monatliche Fehlmengen beim OEM und beim Lieferanten ausgewiesen. Die Flexibilität des OEMs wird einerseits im Vergleich zur aktuell geplanten Kapazität und andererseits zur maximal möglichen Kapazität berechnet. Die Flexibilität des volumenflexiblen Vertrags orientiert sich an der oberen Grenze des Flexibilitätskorridors und die Flexibilität der Vergabematrix an der Volumengrenze der jeweiligen Volumenstufe. Die Flexibilitätskosten des OEMs ergeben sich aus der Multiplikation der Kosten der Flexibilitätsmaßnahme und der Mitarbeiteranzahl. Analog dazu werden die Schichtkosten berechnet, welche zusammen mit den Flexibilitätskosten die Produktionskosten ergeben. Die Gesamtkosten werden je Vertrag ausgegeben und umfassen die Produktionskosten und die im vorherigen Submodul berechneten Lieferantenkosten.

Für jede Wandlungskonfiguration wird ein Simulationslauf erstellt. Anschließend werden in einer Monte-Carlo-Simulation verschiedene Nachfrageszenarien berechnet. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden für jeden Simulationslauf 100.000 Replikationen berechnet. Die Nachfrageszenarien werden auf den Bereich $\pm 1\sigma$ Sigma eingeschränkt. In Abhängigkeit von der Standardabweichung kann es andernfalls zu unzulässigen Ergebnissen kommen. Die Entscheidung, welche Wandlungskonfiguration empfohlen wird, basiert auf einer gewichteten Punktebewertung. Dabei werden die Differenzen der Durchschnittswerte der Simulationsläufe verglichen. Die Kriterien für den Vergleich sind: Flexibilitäts-, Produktions- und Gesamtkosten, Volumenflexibilität des OEMs sowie die Supply-Chain-Flexibilität. Die Gewichtung variiert abhängig von unternehmerischen Zielgrößen.

Die Verifikation und Validierung des Modells erfolgt mit von RABE vorgeschlagenen Methoden (Rabe et al. 2008). In der Simulationssoftware müssen, außer den Zeit- und Kosteneinheiten, alle Einheiten manuell konfiguriert werden, weshalb ein Dimensionstest durchgeführt wird. Das Modell lässt sich durch eine Veränderung der

Inputdateien auf andere Produktionssysteme adaptieren, sodass die Berechnungslogik der Produktionskapazität und der Kostenberechnung anhand von aufgezeichneten Daten validiert wird. Dabei ergeben sich zwei Differenzen zu der Realität. Zum einen werden in dem Modell häufiger die Flexibilitätsbausteine innerhalb eines Jahres variiert. Zum anderen basiert die Berechnung der Strafkosten beim volumenflexiblen Vertrag auf mathematischen Annahmen. In der Realität beruhen diese Werte auf Verhandlungen zwischen OEM und Lieferanten, die in der Simulation allerdings nicht abzubilden sind, da die Resultate nicht reproduzierbar sind. Die Auswertung der Ergebnisse basiert auf einer Differenzbetrachtung der Simulationsläufe zu einem Referenz-Simulationslauf. Aufgrund des identischen Modellverhaltens in jedem Simulationslauf werden aus den Simulationsergebnissen abgeleitete Aussagen davon nicht beeinträchtigt. Die Absolutwerte der Simulationsergebnisse können allerdings von realen Daten abweichen. Als letzte Validierungsmethode wird auf das Monitoring zurückgegriffen. Hierbei wird für den jeweils ersten Simulationslauf zunächst der Zustand der Variablen je Zeiteinheit überwacht.

4 Beispielszenario und Ergebnisse

Das beschriebene Modell zur Kapazitätsplanung wandlungsfähiger Supply Chains wird anhand eines Beispiels aus der Produktion elektrifizierter Bauteile für einen Zeitraum von 5 Jahren getestet. Dabei werden zwei Linien betrachtet, auf denen insgesamt 7 verschiedene Derivate produziert werden. Die Linien sind in ihrem Aufbau identisch und haben jeweils 5 kapazitätserweiternde Wandlungsoptionen. Die Produktion kann im 1-, 2- oder 3-Schichtmodell betrieben werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Kapazität durch Flexibilitätsbausteine zu erweitern, sodass sich in Summe 30 verschiedene Arbeitszeitmodelle ergeben. Der betrachtete Lieferant liefert eine elektronische Komponente, welche in vier Derivaten verbaut wird. Es liegen jeweils ein Rahmenvertrag und eine Vergabematrix vor.

Das Ergebnis der Referenzplanung sieht einen stufenweisen Ausbau der Produktion bis zum Jahr 4 vor, bei dem jährlich eine Wandlungsoption genutzt wird. Der erste Schritt des entwickelten Kapazitätsplanungsprozesses ermittelt alternative Wandlungskonfigurationen, wobei in diesem Fall rechnerisch 2898 verschiedene Konfigurationen möglich sind. Diese wurden zum Nachweis der Methode und zur Reduktion des Rechenaufwands auf 16 Varianten reduziert, in denen zu identischen Zeitpunkten wie im Referenzplan ausgebaut allerdings die Anzahl der genutzten Wandlungsoptionen variiert wird. Nach der Analyse des Realloptionsansatzes ergeben sich drei Wandlungskonfigurationen, die eine monetäre Verbesserung gegenüber dem Referenzplan versprechen. In der Variante A wird nach dem zweiten Jahr die Wandlungsoption 2 und im dritten Jahr die Wandlungsoption 4 gewählt. Bei Variante B wird bereits im zweiten Jahr auf Wandlungsoption 4 ausgebaut und Variante C wird im ersten Jahr Wandlungsoption 2 und im zweiten Jahr auf Wandlungsoption 3 eingesetzt. Im nächsten Schritt werden für jede Wandlungskonfiguration die Mengenvereinbarungen in den Lieferantenverträgen optimiert. Bei der Vergabematrix werden die ursprünglichen 7 Volumenstufen auf 5 Stufen umverteilt. Die Ergebnisse des volumenflexiblen Vertrags sind in Tabelle 2 für Variante A dargestellt.

Tabelle 2: Darstellung der prozentualen Veränderung der Vertragsvolumen

Vertragsvolumen	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5
Variante A	12 %	17 %	6 %	5 %	-2 %

Im Anschluss wird für jedes Jahr ein Simulationslauf mit 100.000 Replikationen durchgeführt. Die Nachfrage steigt von Jahr 1 bis Jahr 5 um 430 % und die Standardabweichung aus den Prognosen liegt zwischen 54 % im ersten und 46 % im fünften Jahr. Die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Als letzter Schritt wird ein gewichteter Vergleich durchgeführt. Dabei wird die Platzierung jeder Variante mit der Gewichtung multipliziert und die höchste Gesamtsumme, als Entscheidungsempfehlung weitergeleitet. Die Gewichtung der einzelnen Faktoren ist durch unternehmerische Präferenzen festzulegen.

Tabelle 3: Simulationsergebnisse für den vol. flexiblen Vertrag der Varianten A, B und C

durchschnittliche Differenz zum Referenzplan in %	Gewichtung	Variante A		Variante B		Variante C	
		Ergebnis	Rang	Ergebnis	Rang	Ergebnis	Rang
Flexibilitätskosten	2	-38,8 %	2	-39,4 %	3	-35,3 %	1
Produktionskosten	1	-20,7 %	3	-20,5 %	2	-17,0 %	1
Gesamtkosten	3	-11,2 %	3	-11,1 %	2	-10,5 %	1
Flexibilität des OEMs	2	+2,7 %	1	+4,4 %	2	+4,8 %	3
Flexibilität der Supply Chain	3	+9,1 %	2	+5,4 %	1	+32,5 %	3
Summe der Punktbewertung			24		21		21

Daraus wird ersichtlich, dass Wandlungskonfiguration A sowohl monetäre Vorteile als auch Vorteile in der Supply-Chain-Flexibilität bietet. Des Weiteren konnten durch die Supply-Chain-Synchronisierung die Kosten weiter gesenkt werden. Basierend auf den Ergebnissen der Simulation kann eine Empfehlung zur Umsetzung der Wandlungskonfiguration A ausgesprochen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der Publikation wird ein neuer Kapazitätsplanungsprozess für wandlungsfähige Supply Chains vorgestellt. Dabei werden bestehende Arbeiten zur Kapazitätsplanung und -terminierung um den Aspekt der Wandlungsfähigkeit erweitert und der Lieferant in die Planung integriert. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Simulationsabschnitt der Methode. Dabei wird ein System-Dynamics-Simulationsmodell erarbeitet und durch verschiedene Methoden validiert. Innerhalb des vorgestellten Kapazitätsplanungsprozesses dient es der Bestimmung des Ausbaus der

vorteilhaftesten Wandlungskonfiguration des Produktionssystems. Die Simulationsergebnisse zeigen eine Gesamtkostenreduktion von 5 – 11 % je nach gewählter Vertragsart und eine Steigerung der Supply Chain Flexibilität zwischen 9 und 10 %. Die Simulation verschiedener Produktionen deutet des Weiteren auf eine Korrelation zwischen dem Automatisierungsgrad der Produktion und dem Produktionsausbau hin. Dieser Beobachtung wird in weiteren Arbeiten nachgegangen.

Die ausgewählte Simulationsmethode mit System Dynamics eignet sich für Simulationen in der Kapazitätsplanung, allerdings kann im jetzigen Entwicklungsstadium das Potential dieser Simulationsmethode noch nicht vollständig genutzt werden. Aktuell findet eine Berechnung der Produktionsressourcen, wie z. B. der Fläche oder des Personals, und ein Abgleich mit dem vorhandenen Angebot an Produktionsressourcen statt. Dabei werden aber keine Feedbackschleifen betrachtet, die sich ergeben, wenn beispielsweise nicht ausreichend Personal oder Fläche vorhanden sind. Diese werden im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit integriert, sodass deren Auswirkungen in Form einer Sensitivitätsanalyse in die Kapazitätsplanung integriert werden können.

Danksagung

Die Entwicklung des Kapazitätsplanungsprozesses und des Simulationsmodells ist Teil einer Kooperation zwischen dem Fraunhofer IWU und der BMW AG. Die Autoren bedanken sich bei den Mitarbeitern der Produktion elektrischer Antriebe der BMW AG sowie den wissenschaftlichen Mitarbeitern am Fraunhofer IWU für ihre Unterstützung und Bereitstellung von Daten und Informationen, die zur Umsetzung dieser Arbeit benötigt wurden.

Literatur

- Creutzmacher, T.; Berger, U.; Lepratti, R.; Lamparter, S. (2016): The Transformable Factory: Adapting Automotive Production Capacities. In: *Procedia CIRP* 41, S. 171–176.
- Das, S.; Abdel-Malek, L. (2003): Modeling the flexibility of order quantities and lead-times in supply chains. In: *International Journal of Production Economics* 85 (2), S. 171–181.
- Davis, A.; Leider, S. (2018): Contracts and Capacity Investment in Supply Chains. In: *M&SOM* 20 (3), S. 403–421.
- Forrester, J.: *Principles of systems*. Cambridge Mass. u.a.: Productivity Pr 1990.
- Hagspiel, V.; Huisman, K.; Kort, P. (2016): Volume flexibility and capacity investment under demand uncertainty. In: *International Journal of Production Economics* 178, S. 95–108.
- Kampker, A. (2014): *Elektromobilproduktion*. Berlin: Springer Vieweg.
- Klug, F. (2013): How electric car manufacturing transforms automotive supply chains. *European Operations Management Association Conference*. Dublin.
- Knoblich, K.; Heavey, C.; Williams, P. (2012): An evaluation of an option contract in semiconductor supply chains. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. Berlin.

- Lukas, E.; Spengler, T.; Kupfer, S.; Kieckhäfer, K. (2017): When and how much to invest? Investment and capacity choice under product life cycle uncertainty. In: *European Journal of Operational Research* 260 (3), S. 1105–1114.
- Mai, Y.; Jiang, C. (2012): Supply Chain Operation Capacity, Knowledge Management Capacity and Competitive Advantage. In: *AISS* 4 (19), S. 336–344.
- Martínez Sánchez, A.; Pérez Pérez, M. (2005): Supply chain flexibility and firm performance. In: *Int Jnl of Op & Prod Mngemnt* 25 (7), S. 681–700.
- Möller, N. (2008): Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2008. München: Utz (Forschungsberichte IWB, 212).
- Niemann, J.; Eckermann, C.; Schlegel, A.; Büttner, T.; Stoldt, J.; Putz, M. (2018): Requirements for Volume Flexibility and Changeability in the Production of Electrified Powertrains. 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC).
- Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Seebacher, G. (2013): Ansätze zur Beurteilung der produktionswirtschaftlichen Flexibilität. Zugl.: Klagenfurt, Alpen-Adria Univ., Diss., 2013. Berlin: Logos-Verl. (Anwendungsorientierte Beiträge zum industriellen Management, 4).
- Sterman, J.: *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world with*: Mcgraw-hill Education - Europe 2000.
- Stevenson, M.; Spring, M. (2009): Supply chain flexibility: an inter-firm empirical study. In: *International Journal of Operations & Production Management* 29 (9), S. 946–971.
- Wang, W.; Li, Y. (2016): Supply chain investments in capacity construction and disruption prevention. 13th International Conference on Service Systems and Service Management.
- Wen, X.; Kort, P. M.; Talman, A. (2015): Volume Flexibility and Capacity Investment. A Real Options Approach. In: *CentER Discussion Paper* (Vol. 2015-022).
- Westkämper, E.; Zahn, E. (2009): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Zapp, M.; Forster, C.; Verl, A.; Bauernhansl, T. (2012): A Reference Model for Collaborative Capacity Planning Between Automotive and Semiconductor Industry. In: *Procedia CIRP* 3, S. 155–160.
- ZSW (2019): Zahl der Elektroautos steigt weltweit von 3,4 auf 5,6 Millionen. Wachstum beschleunigt sich weiter / Deutsche Hersteller unter den Top 10. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Online verfügbar unter <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/zahl-der-elektroautos-steigt-weltweit-von-34-auf-56-millionen.html>, zuletzt aktualisiert am 11.02.2019, zuletzt geprüft am 04.05.2019.